



Received: 29-09-2015

Accepted: 07-10-2015

Anales de Edificación

Vol. 2, N°1, 38-48 (2016)

ISSN: 2444-1309

Doi: 32042: 8: /cf g0423803; 9

El enfoque adaptativo del confort térmico en Sevilla

The adaptive approach to thermal comfort in Seville

D. Sánchez^a, C. Sánchez-Guevara^a & C. Rubio^b

^a Universidad Politécnica de Madrid (España, danielsgaparejador@gmail.com; carmen.sanchezguevara@upm.es), ^b Universidad del Bío-Bío (Chile, carubio@ubiobio.cl)

Resumen— Aunque los estándares de confort en los edificios de oficinas acondicionados con medios mecánicos se han estudiado ampliamente a través de la norma ISO 7730 basada en los estudios de Fanger, todavía no existe un enfoque consensuado para el confort térmico en las viviendas. Muchas de esas viviendas, que componen un bloque, se han construido antes de que se introdujeran normas de ahorro de energía, por lo que existe un alto consumo energético que tiene un efecto sobre el medio ambiente y la economía. A través de los años, el modelo de confort térmico más utilizado se basa en un modelo estático, en el que el ser humano es similar a un receptor pasivo de los estímulos térmicos, mientras que el modelo adaptativo deja en manos del ocupante hacer algunos ajustes y lograr confort a través de acciones y de la adaptación psicológica. La presente investigación tiene como objetivo estudiar los límites de confort adaptativo en una vivienda similar a la mencionada anteriormente, con el fin de regular el uso de aire acondicionado y calefacción, y además reducir el exceso de consumo de energía.

Palabras clave— Confort térmico adaptativo; edificios con ventilación natural; Sevilla; vivienda; eficiencia energética.

Abstract— Although comfort standards in mechanically conditioned office buildings have been widely studied through ISO 7730 developed by Fanger, there is not a consensual approach to thermal comfort in dwellings yet. Many of those dwellings, which compose the housing block, have been built before the energy saving regulations were introduced and are generally neglected, so there is a high energy consumption which has an effect on environment and economy. Through the years, the comfort model applied to thermal comfort is a static model, in which the human being is similar to a passive recipient of thermal stimuli, while the adaptive model let the occupant make some adjustments and achieve their comfort through behavioral and psychological adaption. The present research is aimed to study the adaptive comfort limits in a dwelling similar to the ones mentioned before, in order to regulate the use of air conditioning and heating, and so the energy consumption excess.

Index Terms— Adaptive thermal comfort; Naturally ventilated buildings; Seville; dwellings; Energy efficiency.

I. INTRODUCCIÓN

Los modelos de bienestar adaptativo se han basado

D. Sánchez, es estudiante del máster MAYAB On-line de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura, en la Universidad Politécnica de Madrid (email: danielsgaparejador@gmail.com).

C. Sánchez-Guevara, Grupo de Investigación ABIO. Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. (email: carmen.sanchezguevara@upm.es).

C. Rubio, Doctor Arquitecto, es profesor del Departamento de Ciencia de la Edificación, en la Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío-Bío, Avenida Collao 1202, Concepción 4030000, Chile (e-mail: carubio@ubiobio.cl).

tradicionalmente en un enfoque estático. El confort, como parámetro psicofísico, en las edificaciones con ventilación natural se ha asentado sobre los estudios de Fanger (1970), en los que el ser humano se considera el resultado de una serie de intercambios de calor. Este método ha dado lugar en la actualidad a la UNE-EN ISO 7730, que se utiliza en la actualidad por el Reglamento de Instalaciones Térmicas de Edificios (RITE) para la evaluación de las condiciones térmicas interiores en edificios. Este marco normativo aplica un modelo de confort estático, el cual establece que las condiciones de diseño interiores de la temperatura operativa y humedad relativa se fijan en base a la actividad metabólica, aislamiento de la ropa y porcentaje previsto de insatisfechos, de acuerdo con los siguientes casos:

- Los valores de la temperatura operativa y la humedad relativa están contenidos entre unos límites para personas con una actividad metabólica de 1,1 met, aislamiento de ropa de 0,5 clo en verano y 1 clo en invierno, y un porcentaje de personas insatisfechas (PPD) entre 10 y 15%.
- Para valores diferentes de actividad metabólica, aislamiento de la ropa y PPD de la sección previa, es válido calcular la temperatura operativa y humedad relativa de acuerdo con el procedimiento indicado en UNE-EN ISO 7730.

Por lo que, en cada hora fuera de la zona de confort será necesario tener activado el sistema de calefacción o refrigeración para mantener la temperatura entre 21-23°C en invierno, y 23-25°C en verano. A partir de esto, podemos deducir que a mayor amplitud y mayor adaptación a la temperatura exterior de la zona de confort, menos horas habrá que activar los sistemas activos de climatización y por lo tanto, habrá un menor consumo energético.

En la actualidad, los modelos de confort basados en el enfoque adaptativo afirman que la zona de confort no es estática, contrariamente a lo que ocurre en la UNE-EN ISO 7730, sino que depende de la temperatura exterior media. De esta forma, mientras que el RITE, establece únicamente una zona de confort para invierno y otra para verano que no dependen de la temperatura exterior media, los modelos dinámicos ASHRAE Standard 55-2013 y UNE-EN 15251:2008 incluyen la temperatura media exterior como una variable en el cálculo de los límites de la zona de confort.

Brager y de Dear (1998) citaron que los modelos de balance térmico tienen una concepción de la persona como un objeto pasivo que tiene estímulos termales. Sin embargo, un número creciente de investigadores ha reconocido que los ocupantes interactúan con el ambiente que les rodea, y que adaptarán su conducta y expectativas con tal de buscar el confort térmico. Desde la acción de abrir o cerrar ventanas, subir o bajar persianas, encender ventiladores y ajustar termostatos, hasta cambiar de ropa como demuestran Baker y Standeven (1996).

Incluso generando cierta 'memoria climática' según el estudio de Morgan et al (2002).

Además de los ajustes de comportamiento, los ocupantes también podrían modificar sus expectativas y actitudes en un sentido psicológico (Oseland, 1995). En este sentido un estudio anterior (Humphreys, 1994) argumenta que, si no hay limitaciones respecto a procesos de adaptación, entonces, con el tiempo, las temperaturas neutrales se acercarán a las temperaturas del aire. Se ha argumentado que las diferencias de edificios mecánicamente ventilados respecto a los ventilados de forma natural limitan la adaptación. Los ocupantes de edificios ventilados de forma natural tienen mayor alcance para modificar los ambientes en los que se encuentran (De Dear y Brager, 2002), debido a que el edificio no está mecánicamente controlado. Además, las temperaturas interiores en edificios con ventilación natural tienden a seguir las temperaturas exteriores, mientras que los edificios con aire acondicionado están diseñados para mantenerse en un estrecho rango de condiciones térmicas. Esto significa que los ocupantes que usan aire acondicionado tienden a esperar unas condiciones térmicas mucho más precisas, y es más probable que se sientan insatisfechos si las temperaturas salen del rango de confort.

Así, todo lo anterior sugiere que el modelo Voto Medio Previsto (PMV), modelo en el que se basa la UNE-EN ISO 7730, es más apropiado para estimar la sensación térmica en determinados contextos. El modelo PMV estima la sensación térmica de forma más precisa en edificios acondicionados mecánicamente que en edificios que cuentan con ventilación natural. Estas diferencias en la estimación pueden ser explicadas en gran medida por la menor dependencia de los edificios mecánicamente acondicionados de las temperaturas exteriores, y las menores posibilidades de adaptación, comparados con los edificios ventilados de forma natural.

II. OBJETIVO

El objetivo de esta investigación es establecer las condiciones de bienestar en unas viviendas en Sevilla de acuerdo con criterios de bienestar adaptativo. De este modo, este estudio pretende contrastar las horas que quedan fuera de la zona de confort en el modelo propuesto por el RITE, con los modelos propuestos por ASHRAE Standard 55-2013 y UNE-EN 15251:2008, y conocer en consecuencia las horas en las que no sería necesario utilizar sistemas activos de climatización. Esto conllevaría conocer además el ahorro energético que sería posible obtener, el cual resulta crucial teniendo en cuenta la situación de pobreza energética que sufren muchos hogares en España (Sánchez-Guevara, Sanz & Hernández, 2014). Además, con vistas a un futuro cada vez más inminente, estos modelos de confort adaptativo suponen una herramienta esencial para la estimación y evolución del confort térmico a través del desarrollo del cambio climático

(Rubio-Bellido, Pulido-Arcas & Cabeza-Lainez, 2015).

III. MEDIOS Y MÉTODO

Actualmente existen numerosos estándares de confort adaptativo, de los cuales ASHRAE Standard 55-2013 y UNE-EN 15251:2008 serán aplicados en esta investigación.

A. MÉTODOS DE BIENESTAR EMPLEADOS

1) ASHRAE Standard 55-2013

ASHRAE Standard 55-2013 define los ambientes térmicos aceptables para espacios ventilados de forma natural de acuerdo con las siguientes condiciones:

- No hay ningún sistema de refrigeración mecánico instalado, y ningún sistema de calefacción está en funcionamiento.
- Los ocupantes tienen tasas metabólicas entre 1,0 y 1,3 met.
- Los ocupantes pueden adaptar su ropa a las condiciones térmicas interiores y/o exteriores entre 0,5 y 1,0 clo.
- La temperatura media exterior es mayor que 10°C y menor que 33,5°C.

En este método, el rango de la temperatura de confort interior se determina usando los límites del 80% de aceptabilidad, o aplicando las siguientes fórmulas:

Límite superior de la zona de confort de aceptabilidad del 80% = $0,31 \cdot T_{me} + 21,3$

Límite inferior de la zona de confort de aceptabilidad del 80% = $0,31 \cdot T_{me} + 14,3$

La temperatura media exterior (T_{me}), utilizada en las fórmulas anteriores, está basada en una medición cuya duración no debe ser menos de 7 días ni más de 30 días consecutivos, y debe ser una media aritmética de todas las temperaturas exteriores medias diarias de los días consecutivos que dure el periodo de medición.

2) UNE-EN 15251:2008.

El modelo establecido en esta norma, la cual es un estándar europeo del CEN (Comité Europeo de Normalización), se ha desarrollado a partir un proyecto de control inteligente y confort térmico (Smart control and thermal confort, SCATs), en el que se recopiló información de edificios ventilados de forma natural, así como sus ocupantes. A través de ese proyecto, dirigido por McCartney y Nicol, fue posible desarrollar el algoritmo de control adaptativo.

La aplicación de este modelo es válida para edificios de oficina y otros edificios de tipo similar utilizados principalmente para ocupación humana con actividades sedentarias y viviendas, donde hay fácil acceso a ventanas

operables y los ocupantes pueden adaptar libremente su vestimenta a las condiciones térmicas exteriores u/o interiores.

Respecto a la actividad física de los ocupantes, para que sea de aplicación dichas actividades deben ser casi sedentarias, con niveles de actividad metabólica entre 1,0 y 1,3 met. Por otra parte, los ocupantes deben poder adaptar su aislamiento mediante la ropa sin ninguna restricción, estando entre 0,5 y 1,0 clo.

Debido a las diferentes necesidades de los ocupantes, se establecen 4 grupos, en función de las expectativas que tendrán los ocupantes del edificio, así como otros factores que condicionan la percepción del confort, y de la antigüedad del edificio, siendo los que aparecen en la Tabla I.

TABLA I
CATEGORÍAS DE EDIFICIOS

| Categoría | Explicación |
|-----------|--|
| I | Alto nivel de expectativa, recomendado para espacios ocupados por personas débiles y sensibles con requerimientos especiales, como disminuidos, enfermos, niños muy pequeños y ancianos. |
| II | Nivel normal de expectativa; debería utilizarse para edificios nuevos y renovados |
| III | Aceptable y moderado nivel de expectativa; puede utilizarse en edificios ya existentes |
| IV | Valores fuera de los criterios de las categorías anteriores. Esta categoría sólo debería aceptarse durante una parte limitada del año. |

EFuente: UNE-EN 15251:2008

Para el cálculo de los límites de la zona de confort de la vivienda en estudio, que al ser existente tiene categoría III, se utilizarán las siguientes fórmulas:

Límite superior de la zona de confort: $\Theta_{imax} = 0,33 \cdot \Theta_{rm} + 18,8 + 4$

Límite inferior de la zona de confort: $\Theta_{imin} = 0,33 \cdot \Theta_{rm} + 18,8 - 4$

Los análisis de los modelos de confort reflejan las diferencias que se pueden encontrar entre ambos modelos, siendo principalmente que en el modelo ASHRAE Standard 55-2013 los límites de la zona de confort se pueden determinar aplicando fórmulas ponderadas, de forma que la temperatura de los límites variaría día a día, o utilizando temperaturas constantes en los límites de la zona de confort, que varían en cada periodo de estudio (entre 7 y 30 días), a diferencia del modelo UNE EN 15251, en el que la temperatura únicamente se determina aplicando fórmulas ponderadas. Por otra parte, el rango de la zona de confort en el modelo ASHRAE Standard 55-2013 tiene una amplitud de 7°C, a diferencia del modelo de la UNE EN 15251, que en función de la categoría tiene 4, 6 y 8°C. Respecto al rango de temperaturas en el que son de aplicación los modelos, el modelo ASHRAE Standard 55-2013 es aplicable entre los 10°C y los 33,5°C, mientras que el modelo UNE EN 15251 tiene un rango en el límite superior entre 10°C y 30°C, y en su límite inferior entre 15°C y 30°C, por lo que es más restrictivo.

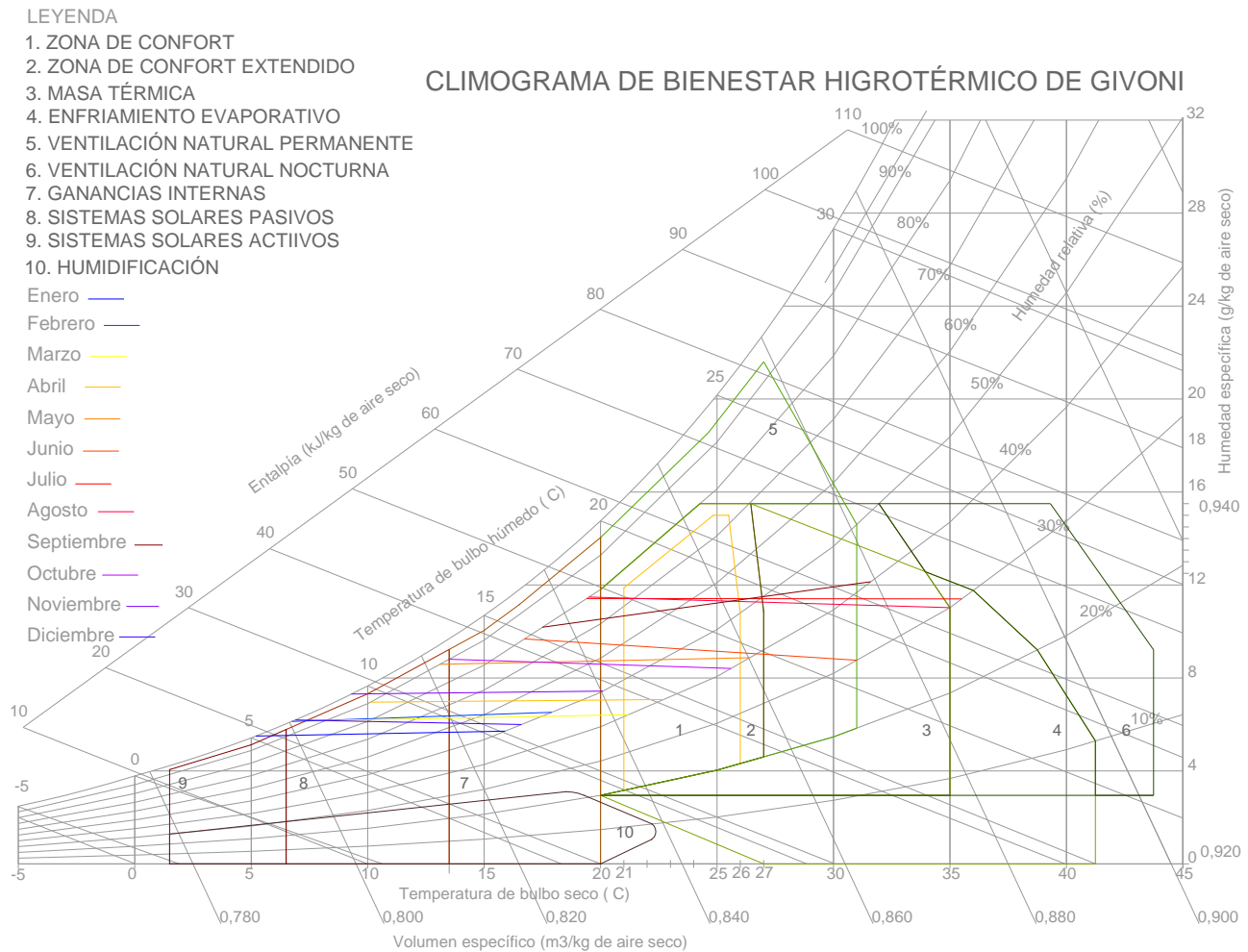


Fig. 1. Diagrama de Givoni para Sevilla.

Teniendo en cuenta que la determinación del rango de confort en el modelo ASHRAE Standard 55-2013 no se utilizará la fórmula ponderada y en el de UNE EN 15251 sí, el modelo de ASHRAE Standard 55-2013 abarcará menos horas dentro de la zona de confort, ya que las temperaturas límite superior e inferior de UNE EN 15251 se adaptarán mejor a las temperaturas exteriores y además, la zona de confort, teniendo en cuenta que el edificio es existente y corresponde a la categoría III, tiene un rango de temperaturas de 8°C.

A. CASO DE ESTUDIO

Para aplicar ambos modelos de confort adaptativo se han registrado temperaturas en la vivienda objeto de estudio siguiendo las condiciones establecidas en ambos modelos, de forma que a partir de los registros se han podido diseñar los gráficos que representan las oscilaciones de temperatura, y que muestran las horas dentro y fuera de la zona de confort. Además, se ha realizado una valoración de las sensaciones térmicas de las personas del vecindario, las cuales habitan en viviendas con las mismas condiciones constructivas que la vivienda objeto de estudio, con la finalidad de contrastar la

estimación obtenida a través de los modelos de confort con las sensaciones térmicas reales. La aplicación de estos modelos de confort es aplicable a localidades situadas en climas mediterráneos semicontinentales, similares al clima de Sevilla, en viviendas similares a la vivienda objeto de estudio, y además podría ser extrapolable a otros climas y otras viviendas aplicando un coeficiente corrector.

El caso de estudio comprende la aplicación de los modelos de confort adaptativo enunciados en la metodología al tipo de vivienda más frecuente anterior al año 1980, y por lo tanto a la publicación de la NBE CT-79 Condiciones térmicas. Se ha optado por estudiar una vivienda situada en Sevilla por la problemática que supone el clima tan extremo que se da en verano.

Sevilla se sitúa en una zona climática templada: tiene un clima mediterráneo húmedo con verano seco, pero situado en un área continental con la peculiaridad de que es una zona de transición debido a la influencia atlántica que penetra por el Guadalquivir; así, los inviernos son húmedos y no muy fríos, al contrario del verano, que es seco y muy cálido.

A continuación se muestra el climograma de bienestar higrométrico de Givoni (Fig. 1), en el que se han representado los meses a partir de la temperatura media de las máximas y la temperatura media de las mínimas así como las humedades relativas máxima y mínima, siendo datos estadísticos recogidos durante varios años por AEMet.

TABLA II

VALORES DE TRANSMITANCIA TÉRMICA

| Material | Espesor (m) | Conductividad térmica (W/mK) | Resistencia térmica (m²K/W) | Transmitancia térmica (W/m²K) |
|---------------------------------------|-------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| R_{si} | - | - | 0,130 | - |
| Enfoscado | 0,020 | 0,570 | 0,035 | - |
| Fábrica ladrillo doble hueco | 0,070 | 0,438 | 0,160 | - |
| Cámara de aire | 0,040 | - | 0,180 | - |
| Enfoscado | 0,015 | 0,570 | 0,026 | - |
| Fábrica ladrillo cara vista perforado | 0,115 | 0,639 | 0,180 | - |
| R_e | - | - | 0,040 | - |
| Total | 0,26 | - | 0,751 | 1,35 |

Esta vivienda tipo es la más frecuente debido a que entre los años 60 y 80 se dio el auge de los edificios de viviendas. Según el Censo de viviendas de 2001 del Instituto Nacional de Estadística, la mayor parte de los hogares de nuestro país (prácticamente un 38%) tienen 5 habitaciones, y la vivienda más típica tiene entre 76 y 90 m².

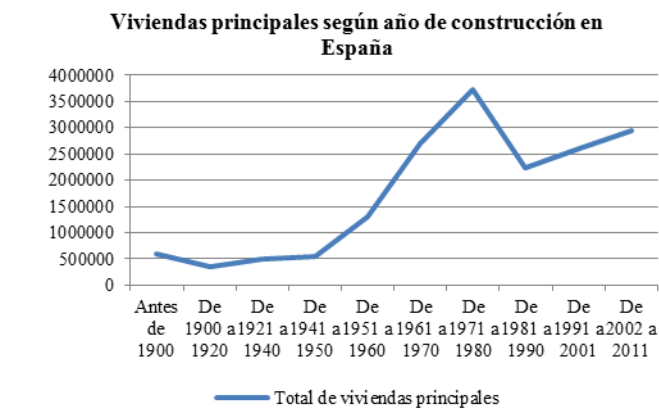


Fig. 2. Viviendas principales según año de construcción en España. Fuente: Instituto Nacional de Estadística.

La vivienda objeto de estudio forma parte de un edificio de apartamentos situado en la barriada de El Tardón, en Sevilla, cuya construcción data del año 1978. Teniendo en cuenta que, según datos del INE, entre 1961 y 1971 se construyeron 2703119 viviendas principales y entre 1971 y 1981 se construyeron 3720472 viviendas principales en España, la suma de ambas constituyen el 35,5% de la totalidad, por lo que éste es el periodo en el que se construyeron más debido al auge de los edificios de varias plantas, similares al edificio en

estudio. Estos datos se pueden observar en la ilustración mostrada (Fig. 2), en la que destaca el incremento de construcción de viviendas entre los años 1961 y 1981.

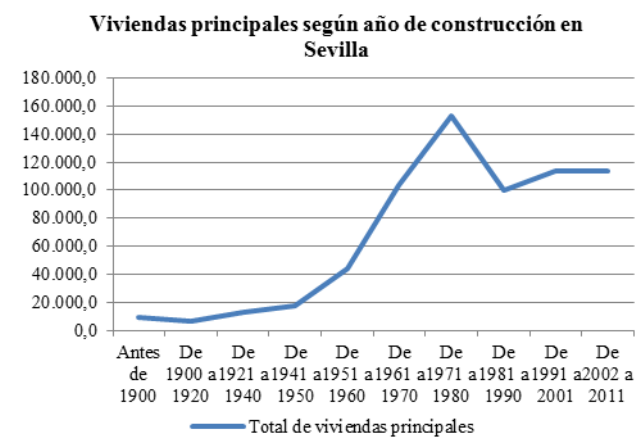


Fig. 3. Viviendas principales según año de construcción en Sevilla Fuente: Instituto Nacional de Estadística.

Por lo tanto, este estudio es de aplicación en viviendas similares a la vivienda objeto del estudio de confort, lo cual se traduce en un gran número de viviendas en Sevilla y otras ciudades con climas similares. Concretamente, únicamente en la provincia de Sevilla, se han construido desde 1960 a 1980 un total de 102838 viviendas principales, según datos del Censo de Población y Viviendas 2011, tal y como se puede observar en la Fig. 3.

El edificio consta de un salón-comedor, una cocina, un baño y tres dormitorios, estando orientados el salón-comedor y uno de los dormitorios hacia el sudeste (desviados 4° hacia el este), y los otros dos dormitorios y la cocina hacia el noroeste (desviados 4° hacia el oeste), que han sido las orientaciones objeto de estudio, tal y como se puede ver en la Fig. 4.

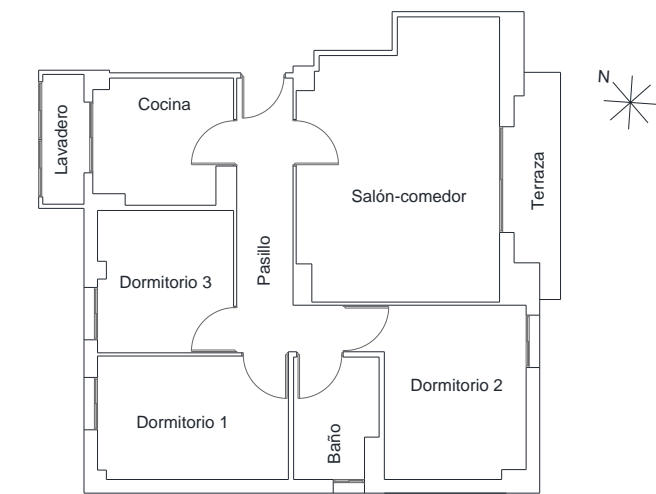


Fig. 4. Distribución de la vivienda.

La fachada está formada por un cerramiento de dos hojas sin aislamiento térmico, que consta de una fábrica de ladrillo doble hueco por el interior, con el correspondiente enfoscado y pintado, una cámara de aire de 4 cm, y ladrillo cara vista por

el exterior. En la Fig. 5 se muestra un detalle constructivo del cerramiento de fachada, el cual es el mismo en la orientación sudeste y noroeste.

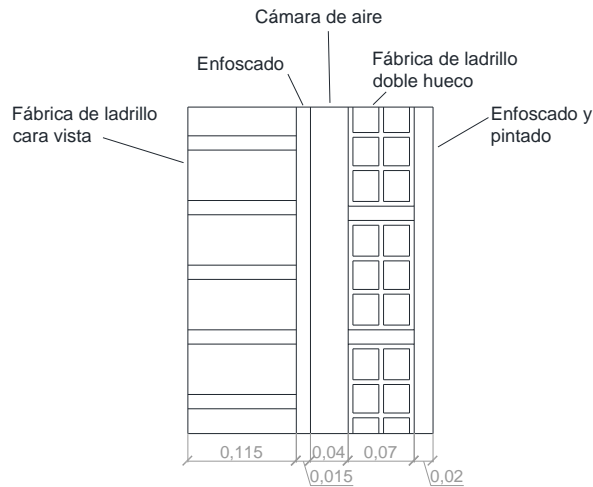


Fig. 5. Detalle de cerramiento de fachada.

Su transmitancia térmica se puede estimar en el siguiente valor, mostrado en la Tabla II.

En este estudio, en el cálculo de la temperatura operativa interior no se tendrá en cuenta la temperatura media radiante debido a que no se ha podido disponer de un termómetro de globo, por lo que se considerará la temperatura operativa interior igual a la temperatura del aire.

TABLA II
VALORES DE TRANSMITANCIA TÉRMICA

| Material | Espesor (m) | Conductividad térmica (W/mK) | Resistencia térmica (m ² K/W) | Transmitancia térmica (W/m ² K) |
|--|-------------|------------------------------|--|--|
| R_i | - | - | 0,130 | - |
| Enfoscado | 0,020 | 0,570 | 0,035 | - |
| Fábrica de ladrillo doble hueco | 0,070 | 0,438 | 0,160 | - |
| Cámara de aire | 0,040 | - | 0,180 | - |
| Enfoscado | 0,015 | 0,570 | 0,026 | - |
| Fábrica de ladrillo cara vista perforado | 0,115 | 0,639 | 0,180 | - |
| R_{se} | - | - | 0,040 | - |
| Total | 0,26 | - | 0,751 | 1,35 |

B. INSTRUMENTOS Y MÉTODO DE MEDICIÓN

Las mediciones de temperatura exterior se han llevado a cabo con sensores HOBO Pendant temperature/light data logger 8K-UA-002-08. La precisión del sensor de temperatura es de ± 0.7 °C. Las mediciones de la temperatura interior se han llevado a cabo con sensores HOBO U12 Temperature/Relative Humidity/Light/External Data Logger -

U12-012. La precisión del sensor de temperatura es de ± 0.7 °C y la precisión del sensor de humedad relativa es de $\pm 5.0\%$.

Los sensores interiores se han situado siguiendo las indicaciones del modelo ASHRAE Standard 55-2013,

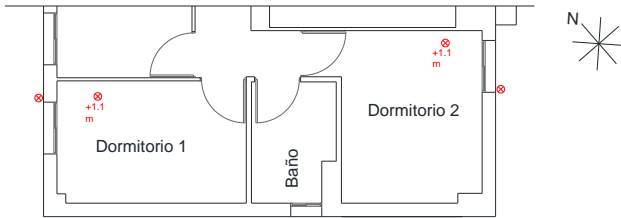


Fig. 6. Ubicación de los instrumentos de medición

apartado 7.3.2 Physical measurement positions within the building. Así, se han situado en las zonas en las que se espera que los ocupantes estén la mayor parte del tiempo. Como en este caso se han situado en las habitaciones de dos estudiantes universitarios, se han dispuesto en las zonas cercanas a los escritorios (Fig. 6). Son zonas, además, cercanas a las ventanas, por lo que se prevé que se den en ellas los parámetros térmicos más extremos. Teniendo en cuenta que los ocupantes emplearán la mayor parte de su tiempo sentados, se han dispuesto los sensores a una altura sobre el suelo de 1,1 metros.

Se ha previsto realizar mediciones periódicas cada 10 minutos durante cuatro periodos de tiempo, de forma que en cada estación haya un periodo que comprenda entre 7 y 30 días, de acuerdo con la metodología de ASHRAE Standard 55-2013. En la Tabla III se muestran los datos más relevantes de los periodos de registro.

TABLA III
PERIODOS DE REGISTRO DE TEMPERATURAS

| Estación | Inicio de periodo de estudio | Final de periodo de estudio | Número de días del periodo |
|------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Invierno | 14/01/2015 a las 00:00 horas | 03/02/2015 a las 00:00 horas | 20 |
| Primavera | 14/05/2015 a las 00:00 horas | 12/06/2015 a las 00:00 horas | 29 |
| Verano | 22/06/2015 a las 00:00 horas | 21/07/2015 a las 00:00 horas | 30 |

Con la finalidad de evaluar la sensación térmica de los ocupantes, se han realizado encuestas a los ocupantes de las viviendas del núcleo residencial Santo Ángel de la Guarda similares a la vivienda objeto del estudio, siguiendo los criterios del Apéndice informativo K (Informative Appendix K Measurements, surveys, and evaluation of comfort in existing spaces: Parts 1 and 2), y utilizando el modelo de encuesta incluido en el estándar que aparece en la figura K-1 (Figure K-1 Thermal environment point-in-time survey), en el cual se incluían cuestiones sobre la sensación térmica, planta, orientación y ubicación en el edificio, prendas de ropa y nivel de actividad. El número de participantes ha sido 37, en el caso del periodo invernal, y de 71 en el caso del periodo estival.

IV. RESULTADOS

A continuación se exponen los resultados de los registros de temperatura en cada fachada y en cada periodo, mostrando en cada análisis los dos modelos adaptativos a aplicar, con la finalidad de contrastarlos, así como el cálculo de los límites de confort en el periodo invernal mediante ambos estándares a modo de ejemplo.

A. Resultados del periodo invernal

A continuación se muestra el proceso de cálculo de los límites de la zona de confort del modelo ASHRAE Standard 55-2013:

Tras realizar la medición de las temperaturas, se ha obtenido que la temperatura media exterior es 11,44°C, la cual queda entre los límites para aplicación del modelo de confort de 10°C y 33,5°C, por lo que aplicando esta temperatura en las fórmulas mostradas anteriormente, obtenemos los límites de la zona de confort:

$$\begin{aligned} \text{Límite superior de la zona de confort de} \\ \text{aceptabilidad del 80\%} &= 0,31 * T_{me} + 21,3 \\ &= 0,31 * 11,44 + 21,3 = 24,85 \text{ °C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Límite inferior de la zona de confort de} \\ \text{aceptabilidad del 80\%} &= 0,31 * T_{me} + 14,3 \\ &= 0,31 * 11,44 + 14,3 = 17,85 \text{ °C} \end{aligned}$$

A continuación se muestra el proceso de cálculo de los límites de la zona de confort del modelo UNE-EN 15251:2008.

Teniendo en cuenta que tratamos con un edificio existente, por lo que pertenece a la categoría III, para obtener los límites diarios de la zona de confort sería necesario aplicar las siguientes fórmulas:

$$\begin{aligned} \text{Límite superior de la zona de confort: } \Theta_{i \max(1)} &= \\ 0,33 * \Theta_{rm(1)} + 18,8 + 4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Límite inferior de la zona de confort: } \Theta_{i \min(1)} &= \\ 0,33 * \Theta_{rm(1)} + 18,8 - 4 \end{aligned}$$

Para lo cual, habría que calcular previamente la media ponderada de funcionamiento, que se muestra a continuación:

$$\Theta_{rm(2)} = (1 - \alpha) * \Theta_{ed-1} + \alpha * \Theta_{rm(1)} \quad (2)$$

Dónde: Θ_{rm} es la temperatura promedio de funcionamiento del día de hoy; Θ_{rm-1} es la temperatura promedio de funcionamiento del día de ayer; Θ_{ed-1} es la temperatura promedio exterior diaria del día anterior; Θ_{ed-2} es la temperatura promedio exterior diaria del día anterior y así a continuación; α es una constante entre 0 y 1, se recomienda usar 0,8.

Cuando no estén disponibles los informes del promedio de aire de la temperatura exterior puede utilizarse la siguiente ecuación aproximada:

$$\Theta_{rm(1)} = (\Theta_{ed-1} + 0,8 * \Theta_{ed-2} + 0,6 * \Theta_{ed-3} + 0,5 * \Theta_{ed-4} + 0,3 * \Theta_{ed-5} + 0,6 * \Theta_{ed-6} + 0,2 * \Theta_{ed-7}) \quad (3)$$

Se ha calculado siguiendo el método mostrado a continuación:

Para la obtención de la primera media ponderada de funcionamiento se ha utilizado la fórmula (3), utilizando la temperatura media diaria de los 7 días previos al primer día del periodo de estudio, resultando una media ponderada de funcionamiento de 10,60°C.

TABLA IV
MEDIAS PONDERADAS DE FUNCIONAMIENTO

| Fecha | Día | Media ponderada de funcionamiento (°C) |
|------------|-----|--|
| 14/01/2015 | 1 | 10,60 |
| 15/01/2015 | 2 | 11,06 |
| 16/01/2015 | 3 | 11,47 |
| 17/01/2015 | 4 | 11,71 |
| 18/01/2015 | 5 | 11,33 |
| 19/01/2015 | 6 | 11,14 |
| 20/01/2015 | 7 | 11,16 |
| 21/01/2015 | 8 | 10,48 |
| 22/01/2015 | 9 | 10,27 |
| 23/01/2015 | 10 | 10,46 |
| 24/01/2015 | 11 | 10,71 |
| 25/01/2015 | 12 | 10,57 |
| 26/01/2015 | 13 | 10,56 |
| 27/01/2015 | 14 | 10,69 |
| 28/01/2015 | 15 | 10,88 |
| 29/01/2015 | 16 | 11,05 |
| 30/01/2015 | 17 | 11,12 |
| 31/01/2015 | 18 | 12,07 |
| 01/02/2015 | 19 | 12,63 |
| 02/02/2015 | 20 | 12,28 |

$$\begin{aligned} \Theta_{rm(1)} &= (\Theta_{ed-1} + 0,8 * \Theta_{ed-2} + 0,6 * \Theta_{ed-3} + 0,5 * \\ &\Theta_{ed-4} + 0,3 * \Theta_{ed-5} + 0,6 * \Theta_{ed-6} + 0,2 * \Theta_{ed-7}) = \\ &(11,36 + 0,8 * 11,88 + 0,6 * 9,33 + 0,5 * 10,58 + 0,4 * \\ &10,90 + 0,3 * 9,01 + 0,2 * 7,45) = 10,60 \text{ °C} \end{aligned}$$

Donde $\Theta_{rm(1)}$ es la media ponderada de funcionamiento del primer día del periodo de estudio, Θ_{ed-1} es la temperatura media del día anterior al primer día de dicho periodo, Θ_{ed-2} es la temperatura media de dos días antes del primer día de dicho periodo, y así a su vez hasta llegar a 7 días antes del inicio del periodo.

Tras la obtención de la primera media ponderada de funcionamiento, se obtienen las de los siguientes días aplicando la fórmula (2), tal y como se muestra a

continuación:

$$\begin{aligned}\Theta_{rm(2)} &= (1 - \alpha) * \Theta_{ed-1} + \alpha * \Theta_{rm(1)} = (1 - 0,8) * \\ &12,89 + 0,8 * 10,60 = 11,06^{\circ}\text{C} \\ \Theta_{rm(3)} &= (1 - \alpha) * \Theta_{ed-1} + \alpha * \Theta_{rm(2)} = (1 - 0,8) * \\ &13,10 + 0,8 * 11,06 = 11,47^{\circ}\text{C} \\ \Theta_{rm(4)} &= (1 - \alpha) * \Theta_{ed-1} + \alpha * \Theta_{rm(3)} = (1 - 0,8) * \\ &12,70 + 0,8 * 11,47 = 11,71^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

Donde $\Theta_{rm(2)}$ es la media ponderada de funcionamiento del segundo día del periodo de estudio, continuando de la misma forma en los siguientes días; Θ_{ed-1} es la temperatura media diaria del día anterior al día que se está estudiando (por ejemplo, en la ecuación del día 18 ($\Theta_{rm(18)}$), Θ_{ed-1} sería la temperatura media diaria del día 19).

Aplicándose sucesivamente hasta el día 20, se obtienen los valores mostrados en la Tabla IV.

Una vez obtenidas las medias ponderadas de funcionamiento, se pueden aplicar las fórmulas para obtener los límites de la zona de confort en cada día:

Día 1:

$$\begin{aligned}\text{Límite superior de la zona de confort: } \Theta_{i \max(1)} &= 0,33 * \\ \Theta_{rm(1)} + 18,8 + 4 &= 0,33 * 10,60 + 18,8 + 4 = 26,30^{\circ}\text{C} \\ \text{Límite inferior de la zona de confort: } \Theta_{i \min(1)} &= 0,33 * \\ \Theta_{rm(1)} + 18,8 - 4 &= 0,33 * 15 + 18,8 - 4 = 19,75^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

Día 2:

$$\begin{aligned}\text{Límite superior de la zona de confort: } \Theta_{i \max(2)} &= 0,33 * \\ \Theta_{rm(2)} + 18,8 + 4 &= 0,33 * 11,06 + 18,8 + 4 = 26,45^{\circ}\text{C} \\ \text{Límite inferior de la zona de confort: } \Theta_{i \min(2)} &= 0,33 * \\ \Theta_{rm(2)} + 18,8 - 4 &= 0,33 * 15 + 18,8 - 4 = 19,75^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

Día 3:

$$\begin{aligned}\text{Límite superior de la zona de confort: } \Theta_{i \max(3)} &= 0,33 * \\ \Theta_{rm(3)} + 18,8 + 4 &= 0,33 * 11,47 + 18,8 + 4 = 26,58^{\circ}\text{C} \\ \text{Límite inferior de la zona de confort: } \Theta_{i \min(3)} &= 0,33 * \\ \Theta_{rm(3)} + 18,8 - 4 &= 0,33 * 15 + 18,8 - 4 = 19,75^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

Aplicándose sucesivamente hasta el día 20, se obtienen los valores relativos a la zona de confort mostrados en la Tabla V. Como se puede observar, como ninguna media ponderada de funcionamiento llega a la temperatura mínima de 15°C a partir de la cual es de aplicación el límite inferior de la zona de confort, se ha considerado esta temperatura como la media ponderada de funcionamiento para dicho límite, lo que deriva en que su temperatura es constante. Esto se traduce en que el modelo considera que por debajo de una media ponderada de funcionamiento de 15°C , que corresponde a una temperatura en el límite inferior de $19,75^{\circ}\text{C}$, el cuerpo humano no puede alcanzar el confort.

En las Fig. 7 y la Fig. 8 se pueden observar y comparar las zonas de confort térmico de los dos modelos de confort, mostrando también la oscilación de la temperatura interior en

TABLA V
LÍMITES SUPERIOR E INFERIOR

| Fecha | Día | Media ponderada de funcionamiento ($^{\circ}\text{C}$) | Media ponderada de funcionamiento para límite superior ($^{\circ}\text{C}$) | Media ponderada de funcionamiento para límite inferior ($^{\circ}\text{C}$) | Límite superior ($^{\circ}\text{C}$) | Límite inferior ($^{\circ}\text{C}$) |
|------------|-----|--|---|---|--|--|
| 14/05/2015 | 1 | 10,60 | 10,60 | 15,00 | 26,30 | 19,75 |
| 15/05/2015 | 2 | 11,06 | 11,06 | 15,00 | 26,45 | 19,75 |
| 16/05/2015 | 3 | 11,47 | 11,47 | 15,00 | 26,58 | 19,75 |
| 17/05/2015 | 4 | 11,71 | 11,71 | 15,00 | 26,67 | 19,75 |
| 18/05/2015 | 5 | 11,33 | 11,33 | 15,00 | 26,54 | 19,75 |
| 19/05/2015 | 6 | 11,14 | 11,14 | 15,00 | 26,48 | 19,75 |
| 20/05/2015 | 7 | 11,16 | 11,16 | 15,00 | 26,48 | 19,75 |
| 21/05/2015 | 8 | 10,48 | 10,48 | 15,00 | 26,26 | 19,75 |
| 22/05/2015 | 9 | 10,27 | 10,27 | 15,00 | 26,19 | 19,75 |
| 23/05/2015 | 10 | 10,46 | 10,46 | 15,00 | 26,25 | 19,75 |
| 24/05/2015 | 11 | 10,71 | 10,71 | 15,00 | 26,33 | 19,75 |
| 25/05/2015 | 12 | 10,57 | 10,57 | 15,00 | 26,29 | 19,75 |
| 26/05/2015 | 13 | 10,56 | 10,56 | 15,00 | 26,28 | 19,75 |
| 27/05/2015 | 14 | 10,69 | 10,69 | 15,00 | 26,33 | 19,75 |
| 28/05/2015 | 15 | 10,88 | 10,88 | 15,00 | 26,39 | 19,75 |
| 29/05/2015 | 16 | 11,05 | 11,05 | 15,00 | 26,45 | 19,75 |
| 30/05/2015 | 17 | 11,12 | 11,12 | 15,00 | 26,47 | 19,75 |
| 31/05/2015 | 18 | 12,07 | 12,07 | 15,00 | 26,78 | 19,75 |
| 01/06/2015 | 19 | 12,63 | 12,63 | 15,00 | 26,97 | 19,75 |
| 02/06/2015 | 20 | 12,28 | 12,28 | 15,00 | 26,85 | 19,75 |

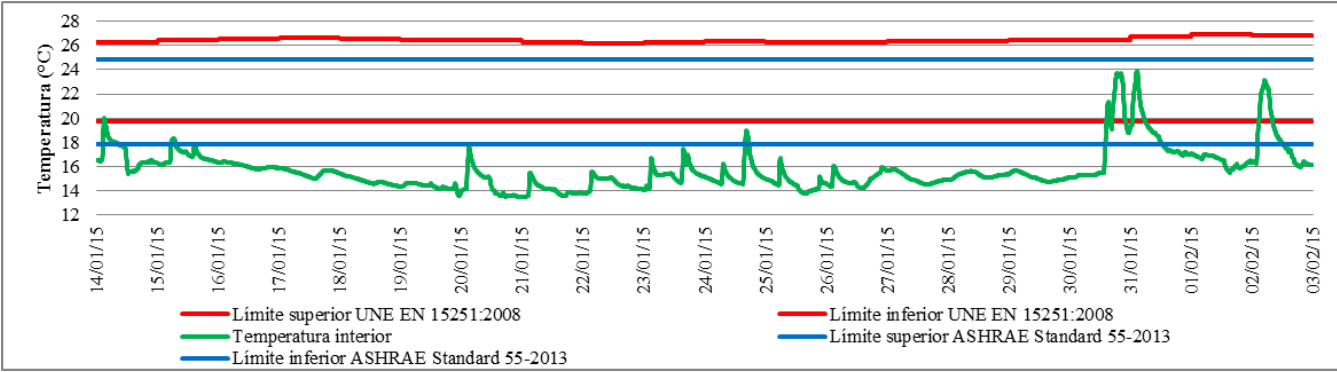


Fig. 7. Comparación de las zonas de confort en la fachada noroeste durante el periodo invernal.

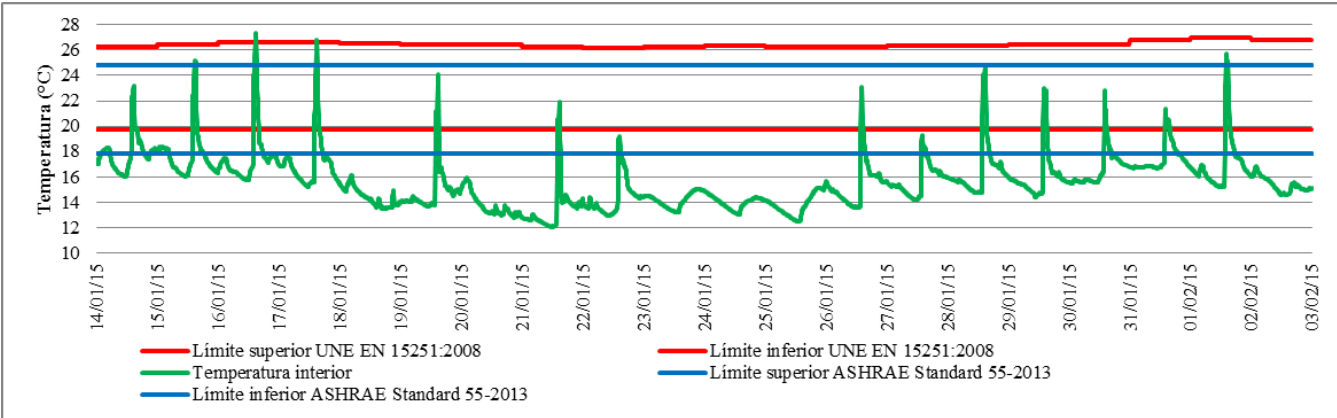


Fig. 8. Comparación de las zonas de confort en la fachada sudeste durante el periodo invernal.

la fachada noroeste y sudeste respectivamente.

La zona de confort del modelo ASHRAE Standard 55-2013 se adapta a la variación de temperaturas medias al cambiar los límites de la zona de confort en cada periodo, que tiene entre 7 y 30 días. En este caso, no se observa variación ninguna en la ilustración anterior debido a que únicamente está siendo representado un periodo. Sin embargo, el modelo UNE EN 15251 se adapta mejor a dichas variaciones de temperatura al tener respuesta en periodos diarios, aunque en este caso el límite inferior no varía. En resumen, mientras que el modelo de ASHRAE Standard 55-2013 se adapta a la temperatura exterior cada periodo de entre 7 y 30 días, el modelo de UNE EN 15251 lo hace diariamente.

TABLA VI
RESULTADOS DEL ENCUESTADO

| Escala de sensación térmica de ASHRAE | Número de votos |
|---------------------------------------|-----------------|
| Muy cálido (3) | 0 |
| Cálido (2) | 0 |
| Ligeramente cálido (1) | 0 |
| Normal (0) | 6 |
| Ligeramente frío (-1) | 7 |
| Frío (-2) | 21 |
| Muy frío (-3) | 3 |
| Total | 37 |

Respecto al encuestado, teniendo un aislamiento de ropa

medio de 1,01 clo, se muestra a continuación la Tabla VI, en la aparecen los resultados mostrando únicamente la escala de sensación térmica y el número de votos.

Teniendo en cuenta que se consideran temperaturas aceptables las marcadas como ligeramente cálidas, normales y ligeramente frías, se puede observar la congruencia entre los resultados de las encuestas y los del estudio de confort térmico, al haber 23 ocupantes sintiendo malestar frente a 9 en confort, contando con la adaptación psicológica y en conducta de cada uno, lo cual se traduce en que dicha adaptación psicológica y en conducta no es suficiente para que la mayoría de los ocupantes sientan bienestar.

En la Tabla VII se resume las horas que quedan dentro, por encima y por debajo de la zona de confort en cada fachada según cada modelo de confort, para el periodo invernal.

B. Resultados del periodo estival

En la Fig. 9 y la Fig. 10 se pueden observar y comparar las zonas de confort térmico de los dos modelos de confort en ambas fachadas. Se puede observar la gran amplitud de las oscilaciones térmicas que se producen en la fachada sudeste respecto a la fachada noroeste, debido a la acción de la incidencia solar directa. Estas oscilaciones tan pronunciadas en la fachada sudeste conllevan unas altísimas temperaturas

que superan los límites superiores de las zonas de confort de ambos modelos, y durante las cuales, se estima que el cuerpo humano sintió malestar térmico.

En la Tabla VIII se resumen las horas que quedan dentro, por encima y por debajo de la zona de confort en cada fachada según cada modelo de confort, para el periodo estival.

TABLA VII
RESULTADOS DEL PERIODO INVERNAL

| | | | | ASHRAE Standard 55-2013 | UNE-EN 15251:2008 |
|-------|------------------|------------|---|----------------------------|----------------------|
| Horas | Fachada noroeste | Por encima | h | 0 | 0 |
| | | | % | 0% | 0% |
| | | Dentro | h | 41,66 | 15,14 |
| | | | % | 8,68% | 3,15% |
| | | Por debajo | h | 438,34 | 464,86 |
| | | | % | 91,32% | 96,85% |
| | Fachada sudeste | Por encima | h | 2,5 | 0,57 |
| | | | % | 0,52% | 0,12% |
| | | Dentro | h | 49,5 | 15,29 |
| | | | % | 10,31% | 3,18% |
| | | Por debajo | h | 428 | 464,14 |
| | | | % | 89,17% | 96,70% |

TABLA VIII
RESULTADOS DEL PERIODO ESTIVAL

| | | | | ASHRAE Standard 55-2013 | UNE-EN 15251:2008 |
|-------|------------------|------------|---|----------------------------|----------------------|
| Horas | Fachada noroeste | Por encima | h | 176,43 | 6,71 |
| | | | % | 24,50% | 0,93% |
| | | Dentro | h | 543,57 | 713,29 |
| | | | % | 75,50% | 99,07% |
| | | Por debajo | h | 0 | 0 |
| | | | % | 0,00% | 0,00% |
| | Fachada sudeste | Por encima | h | 245,57 | 101,9 |
| | | | % | 34,11% | 14,07% |
| | | Dentro | h | 474,43 | 615,71 |
| | | | % | 65,89% | 85,51% |
| | | Por debajo | h | 0 | 3 |
| | | | % | 0,00% | 0,42% |

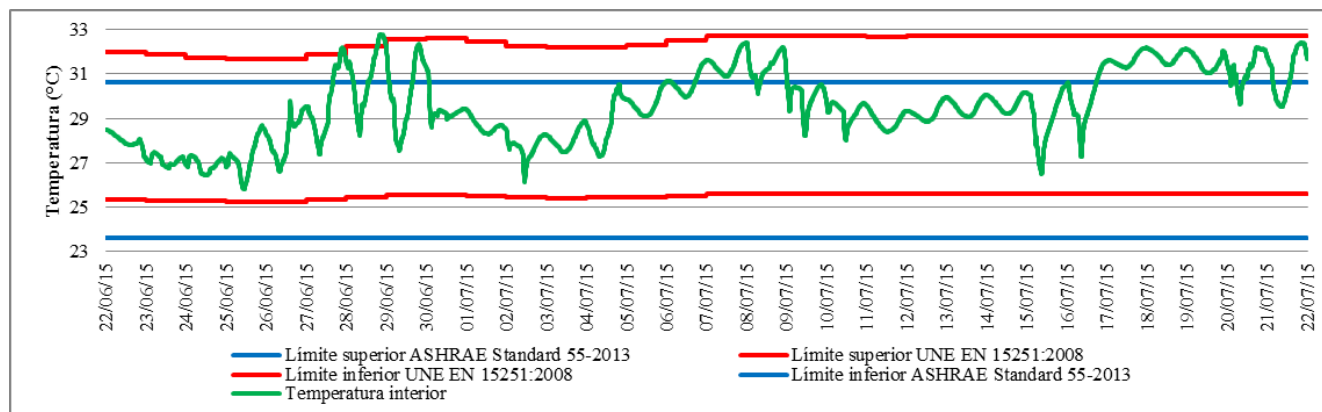


Fig. 9. Comparación de las zonas de confort en la fachada noroeste durante el periodo estival.

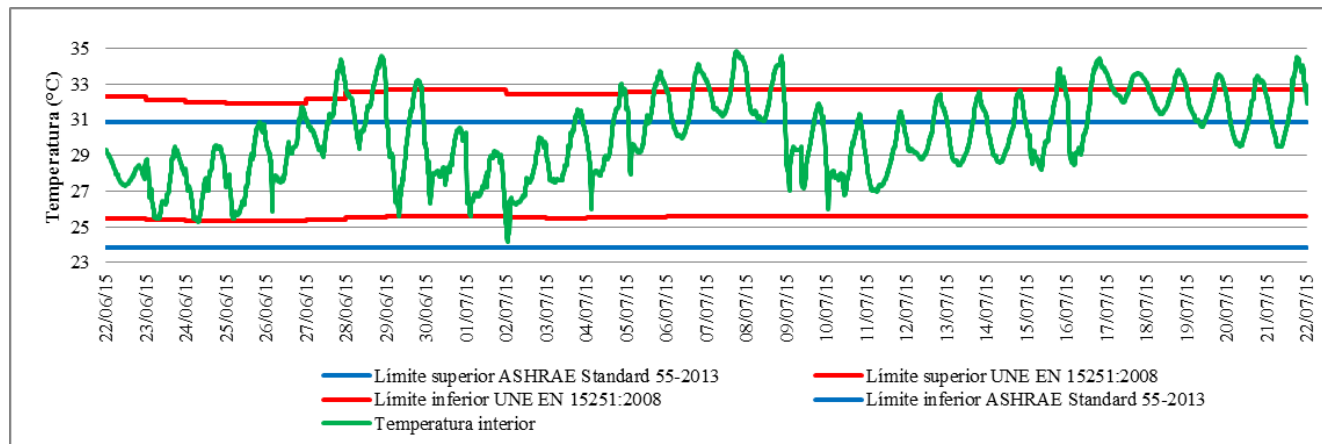


Fig. 10. Comparación de las zonas de confort en la fachada sudeste durante el periodo estival.

V. CONCLUSIONES

Tras el análisis de los resultados del periodo invernal, se puede observar que en el modelo ASHRAE Standard 55-2013 hay más horas dentro de la zona de confort (41,66 en fachada noroeste, 49,5 en fachada sudeste) que en el modelo UNE EN 15251 (15,14 en fachada noroeste, 15,29 en fachada sudeste), lo cual se debe a que el límite inferior de la zona de ASHRAE Standard 55-2013 es más baja, lo que da a entender que este modelo considera que las personas sienten bienestar a temperaturas menores (mientras que la media de la temperatura del límite inferior es 19,75°C en UNE EN 15251, dicho límite inferior es en el modelo ASHRAE Standard 55-2013 es 17,85°C)

Tras el análisis de los resultados del periodo estival, se puede observar que en el modelo ASHRAE Standard 55-2013 hay menos horas dentro de la zona de confort (543,57 en fachada noroeste, 474,43 en fachada sudeste) que en el modelo UNE EN 15251 (713,29 en fachada noroeste, 615,71 en fachada sudeste), lo cual se debe a que los límites de la zona de confort de la UNE EN 15251 se adaptan mejor a las variaciones de temperaturas, tanto a la respuesta respecto del día anterior, como las temperaturas que abarca la zona, que en el caso de la UNE-EN 15251 son más altas que en el de ASHRAE Standard 55-2013.

Una vez contrastados los resultados de las encuestas con los resultados del estudio de las zonas de confort, se observa que mientras durante el periodo invernal son congruentes, en el periodo estival son discordantes.

Como conclusión, cabe destacar que este estudio resalta la capacidad del ser humano de adaptarse a distintas temperaturas hasta ciertos límites, las cuales están mermadas en modelos de confort estáticos, y permite la estimación de las horas en las que se activan de forma innecesaria los sistemas activos de climatización mediante el contraste entre los resultados obtenidos con los modelos adaptativos y el modelo establecido por el RITE.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al vecindario de la urbanización Santo Ángel de la Guarda su colaboración en la realización de las encuestas.

REFERENCIAS

AENOR (2008). Parámetros del ambiente interior a considerar para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética de edificios incluyendo la calidad del aire interior, condiciones térmicas, iluminación y ruido. UNE-EN 15251:2008 EX. Madrid: Aenor, 2008.

AENOR (2006). Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar

térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local. UNE-EN ISO 7730:2006. Madrid: AENOR, 2006.

American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). (1992). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (ASHRAE Standard 55-1992). Atlanta, GA: ASHRAE.

Baker, N., & Standeven, M. (1996). Thermal comfort for free-running buildings. *Energy and Buildings*, 23(3), 175-182.

Brager, G. S., & de Dear, R. J. (1998). Thermal adaptation in the built environment: A literature review. *Energy and Buildings*, 27, 83-96.

de Dear, R. J., & Brager, G. S. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, 34(6), 549-561.

Fanger, P.O. (1970). Thermal Comfort. Copenhagen: Danish Technical Press.

Humphreys, M. A. (1994). Field studies and climate chamber experiments in thermal comfort research. In N. A. Oseland & M. A. Humphreys (Eds.), *Thermal Comfort : Past Present and Future* (pp. 52- 72). Garston, UK: Building Research Establishment.

Instituto Nacional de Estadística (2001). Censo de viviendas de 2001. Madrid, 2001.

Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2007). Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE). Madrid, 2007.

Morgan, C. A., de Dear, R., & Brager, G. (2002). Climate, clothing and adaptation in the built environment. In H. Levin (Ed.), *Indoor Air 2002: The 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate* (vol. 5, pp. 98-103). Santa Cruz, CA: Indoor Air 2002.

Oseland, N. (1995). Predicted and reported thermal sensation in climate chambers, offices and homes. *Energy and Buildings*, 23, 105-115.

Rubio-Bellido, C., Pulido-Arcas, J.A., & Cabeza-Lainez J.M. (2015). Adaptation Strategies and Resilience to Climate Change of Historic Dwellings. *Sustainability*. 7(4), 3695-3713.

Sánchez-Guevara, C., Sanz Fernández, A., Hernández Aja, A. 2014. Income, energy expenditure and housing in Madrid. *Building Research and Information*. DOI:10.1080/09613218.2014.984573.